'97 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MELCOR 코드를 이용한 PHEBUS FPT-1 실험해석

조 성원, 홍성완
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

중대사고 시 핵연료와 핵분열생성물의 거동을 파악하기 위한 PHEBUS FPT-1 실험을 MELCOR 코드로 해석함으로써 코드의 모의 능력 및 실험의 최근 연구 동향과 측정의 타당성을 파악할 수 있었다. 노심을 포함한 전 계통의 열수력 거동에 대한 모의 결과는 측정 자료와 비교.분석하여 매우 타당한 결과를 얻은 것으로 판단되었다.

1. 서론

프랑스의 Cadarache 연구소에서 수행 중인 PHEBUS FP 프로그램[1]은 PWR의 중대사고시 핵연료의 손상(degradation)과 함께 핵분열생성물(FP)과 에어로졸의 방출.이송.부착 등에 관한 물리.화학적 성질을 파악하는 것으로서 두번째 실험인 FPT-1 실험은 1996.7.26에 수행되었으며, 측정 자료 중 열수력에 관한 일부 자료[2]가 97년5월에 입수되어 실험해석에 주력할 수 있었다. 그러나 아직 FP와 에어로졸에 관한 측정 자료를 입수하지 못하였기 때문에 이들에 관한 해석결과를 측정치와 비교할 수 없었지만 코드내의 모델을 검토하고, FP의 거동을 해석하였다. 최근의 PHEBUS FP 프로그램은 노심의 핵연료 거동으로 부터 점차적으로 FP와 에어로졸의 물리.화학적 성질의 규명에 더 많은 노력을 기울이는 방향으로 변환되고 있다.

본 실험해석에 사용된 MELCOR 코드는 US.NRC의 주관하에 SNL에서 개발된 2세대 risk 코드로서 현재 version 1.8.3을 사용하여 중대사고 해석에 충분히 사용할 수 있으나 아직 포함되지 않은 현상들이 있으므로 많은 수정과 개량을 시킨 새로운 version 1.8.4가 곧 도입될 예정이다.

PHEBUS FPT-1 실험의 모의는 코드의 입력 작성, 열수력 거동해석 및 측정치와의 비교, 그리고 핵분열생성물 거동해석의 순서로 진행하였다. 입력은 가능한 실험 자료를 이용하였으며, 해석결과

열수력 거동은 비교적 잘 모의하고 있었으며, 핵분열생성물의 거동중 부착량의 모의도 타당한 것으로 판단되었다.

2. 입력작성

실험을 모의하기 위하여 그림 1과 같이 전 계통을 17개의 제어체적(control volume)으로 나누었으며, 노심은 12개의 axial node(10 fuel)와 3개의 radial node로 나누었다. 입력 작성에 필요한 자료 중 기하학적 구조와 물성치, 핵분열생성물의 초기재고량 등 대부분은 실험준비를 위한 설계도면에 기초를 둔 PHEBUS FP Data Book[3]에서 얻었으며, 노심 출력 등 열수력 경계 조건에 관련된 것들은 실험의 측정자료를 통하여 얻었다. 그러나 노심의 출력 분포는 PHEBUS FP 회의 자료나 다른 사람들의 예비 계산[4-6]에서 사용된 값을 참조하여 작성하였다.

입력의 특기사항으로는 다음의 두가지가 있다.

1) MELCOR 코드에서는 피복관이 산화되어 사용자가 입력한 두께 이하에 도달하면 핵연료가 파편화되어 하부로 재배치되도록 되어 있으나 이러한 경우에 재배치가 너무 일찍 일어나므로 용융이 일어나기 이전에는 재배치가 발생하지 않도록 하는 선택(option)를 사용하였다.

2) Shroud내에 있는 공기 갭(gap)이 온도가 증가함에 따라 변형이 발생하는 것을 고려하였다. 갭의 변형은 약 10,000초 까지 서서히 진행되고 있는 것으로 판단되지만 해석에서는 4,000초에 갭 간격이 변경되는 것으로 가정하였다.

3. 해석결과 및 검토

가. 열수력 거동

열수력 거동을 파악하기 위해서는 노심의 열 발생과 방출, 핵연료의 재배치, 그리고 파이프와 격납용기내에서의 가열과 열제거를 적절히 모의하여야 한다. 최초로 작성된 입력을 이용하여 열수력 거동을 검토한 결과 노심에서의 열 발생이 방출보다 크기 때문에 핵연료와 노심의 가스 온도가 측정치에 비해 높게 나타났다. 이를 보완하기 위해서는 노심의 열 출력을 줄여주는 방법과 shroud를 통한 열 제거를 증가시키는 방법이 있다. 최근 자료[7]에 의하면 열 출력의 측정에는 약 10%의 오차가 존재할 수 있으며, shroud의 열전도도에는 많은 불확실성이 존재하지만 측정된

열전도도가 점차로 낮아지고 있는 경향을 보이고 있다. 본 해석에서는 불확실성이 큰 shroud의 열전도도를 약 20% 정도 증가시켰으며, 열출력을 감소시키는 경우에 대해서는 추후에 수행할 예정이다.

증기발생기를 포함한 파이프와 격납용기내에서의 열수력 거동을 파악할 수 있는 압력 변화를 측정치와 비교하여 그림 2에서 보여주고 있다. 해석에서 약 4,000초 부근에 열 제거가 많으므로 온도가 약간 낮지만 전체적으로 잘 모의하고 있다.

노심의 열수력 거동은 핵연료와 피복관의 온도, 수소가스의 발생률 등으로 파악할 수 있다. 핵연료와 피복관의 온도는 그림 3에서 보여주는 바와 같이 측정치를 매우 잘 모의하고 있지만 약 10,000초 이후에 높게 예측하고 급격한 산화 반응이 일어나는 시간이 빨라진다. 측정에서 16,000초 부근에서 측정치의 급격한 변화는 열전대(TC)의 파손에 의한 것으로 보인다. Shroud 내의 위치에 따른 온도변화를 측정함으로써 shroud를 통한 열방출과 노심내에서 열전대가 파손된 이후의 온도변화를 간접적으로 파악할 수 있다. 그림 4와 5에 높이에 따른 shroud 내의 온도변화를 보여주고 있다. 그림 4에서 shroud의 온도를 전반적으로 잘 모의하고 있지만 그림 5에서 16,000초 이후의 온도를 낮게 예측하고 있는 것은 입력에서 핵연료의 debris 형성에 의한 재배치가 일어나지 않도록 하였기 때문이다. 수소가스 발생률의 변화는 그림 6에서 보여주는 바와 같이 측정치를 잘 모의하고 있으나 총발생량(그림 7)은 약 90 g으로 측정에서 얻은 96 g 보다 적게 모의 되었다. 해석에서 핵연료와 피복관의 온도가 높음에도 불구하고 수소의 총발생량이 적게 나타난 것도 debris 형성에 의한 재배치가 일어나지 않도록 하였기 때문이다.

나. 핵분열생성물과 에어로졸의 거동

핵분열생성물과 에어로졸의 거동에 관한 해석은 아직 측정자료를 입수하지 못하였으므로 MELCOR 코드내에 함유되어 있는 3개의 방출모델(CORSOR, CORSOR-M, CORSOR-BOOTH)에 대한 비교.검토를 수행하였으며, 파이프와 격납용기내에서의 부착률을 해석하였다. 그림 8에 휘발성 원소의 방출율로 Cs를 대표적으로 보여주고 있으며, 그림 9에는 비휘발성 원소인 Sn의 방출율을 대표적으로 보여주고 있다. 휘발성 원소의 방출율은 비교적 잘 알려져 있으므로 모델에 따른 차이가

적지만, 비휘발성 원소들은 방출분율에서 큰 차이를 나타내고 있었으므로 측정자료를 이용한 판단이 필요하다.

그림 10과 11에 실험장치의 위치에 따른 대기중의 농도를 보여주고 있다. 해석결과에서 휘발성이 강한 원소들(Cs, I, Te)은 증기발생기내에 30% 이상 부착되며, 비휘발성 원소들(Ru, La ..)은 고온관에 약 40% 정도가 부착되고 증기발생기에 약 20% 정도 부착되는 것으로 모의되었다. 이와같은 부착량은 FPT-0 실험에서 증기발생기에 약 20% 정도 부착된 것으로 해석된 결과와 매우 유사하다.

4. 결론

열수력 거동에 관한 모의는 측정치와 비교하여 본 결과 실험모의는 성공적이었으며, 핵분열생성물에 대한 모의결과는 이에 대한 측정결과를 받아서 비교.검토하여야 결과를 판단할 수 있다.

열수력 거동에서 핵연료와 증기의 온도를 높게 예측하고 있다. 이는 열출력이 많거나 Shroud를 통한 열 방출이 적기 때문이라 생각된다. 즉 노심의 열출력을 줄이거나 shroud 내 ZrO_2의 전도도가 더 커야 한다.

핵분열생성물 방출에서 두개의 모델(CORSOR, CORSOR-M)이 휘발성원소는 유사하게 모의하지만, 비휘발성원소는 CORSOR-M에서 낮게 평가하고 있다. 핵분열생성물 침전에 있어서는 휘발성 원소는 방출량의 약 30%가 증기발생기에 부착되며, 비휘발성 원소는 고온관에 40%, 증기발생기에 약 20% 부착되므로 휘발성 원소는 방출량의 약 70%, 비휘발성 원소는 약 40% 만이 격납용기로 이동된다.

참고문헌

1. Von der HARDT, et al. "The PHEBUS FP Severe Accident Experiment Program", Nuclear. Safety 35(2) (1994).
2. B.Berthet, et al. "FPT1 Quick Look Report" Note Technique LERES No 55/96, PF IP/96/310.
3. PHEBUS FP Data Book FPT1 PHEBUS PF IS/92/49
4 S.Bourdon and M.Mulet "PHEBUS FPT1 Test Pre-test Calculation for the Bundle" Note Technique SEMAR 95/63, PF 95/63.
5. S.Bourdon and M.Mulet "PHEBUS FPT1 Pre-test Calculation for the Bundle" Note Technique SEMAR 95/114, PF 95/257. .
6. T.G.Williams, et al. "PHEBUS FP Core Degradation Studies Using SCDAP/RELAP5" PH-FP AE/96/18, AEA/CS/24059002/001
7. Private Communication during PHEBUS FP Meeting (22-26 Sep. 1997)

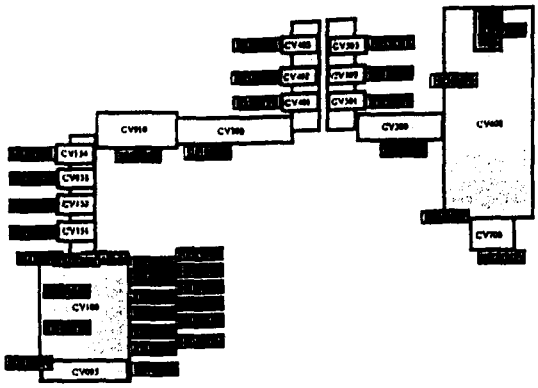

Fig.1 Nodalization

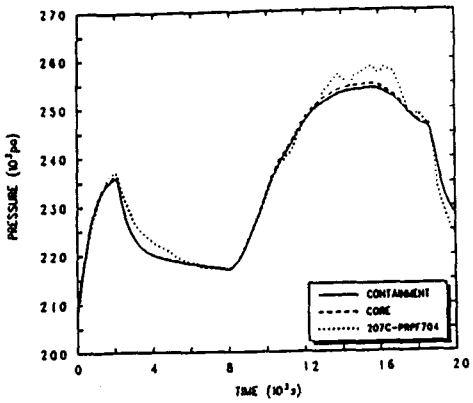

Fig.2 Containment Pressure

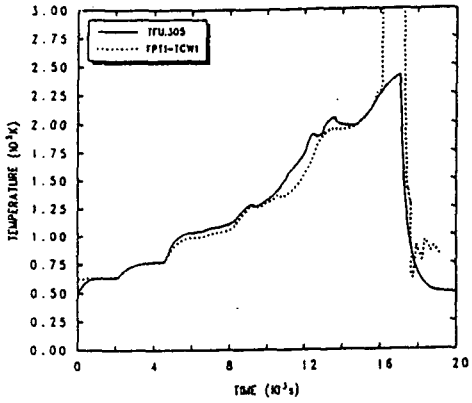

Fig.3 Fuel Temperature at 300mm

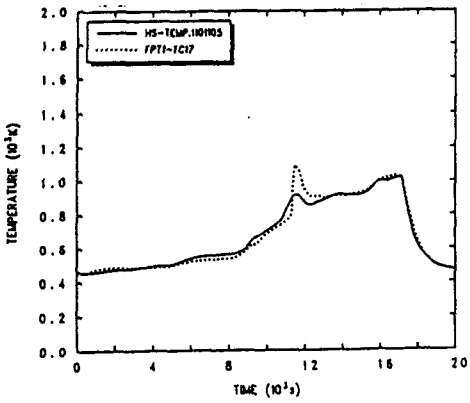

Fig.4 Shroud Temperature at 300mm

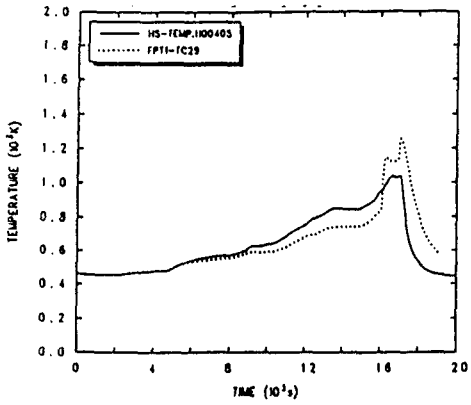

Fig.5 Shroud Temperature at 200mm

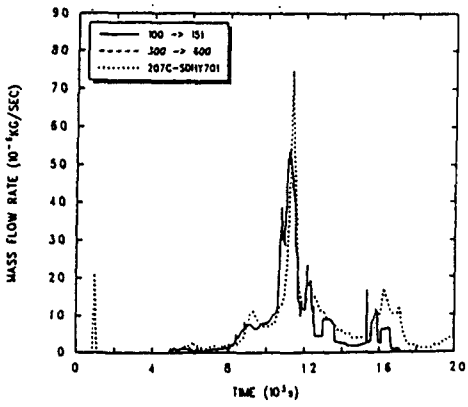

Fig.6 Hydrogen Mass Flow Rate

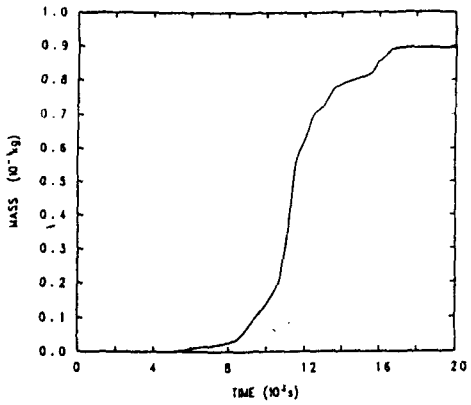

Fig.7 Accumulative Hydrogen Production

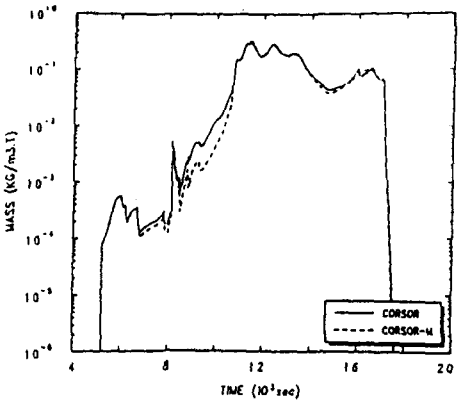

Fig.8 Cs Release Rate

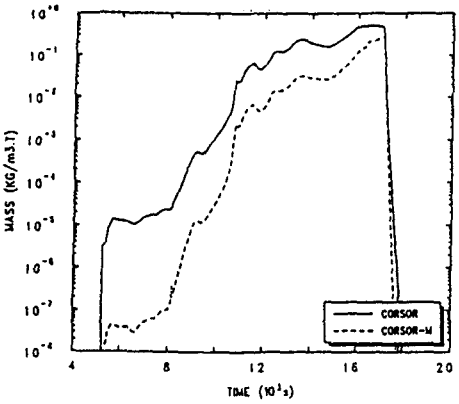

Fig.9 Sn Release Rate

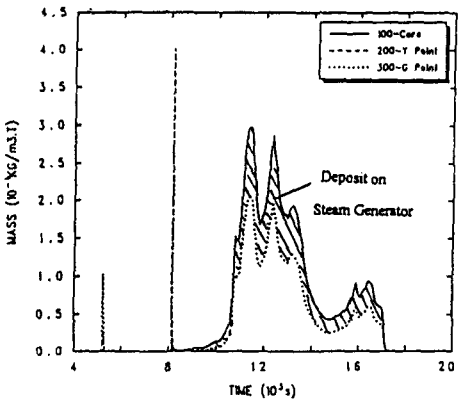

Fig.10 Relative Mass Density of Cs

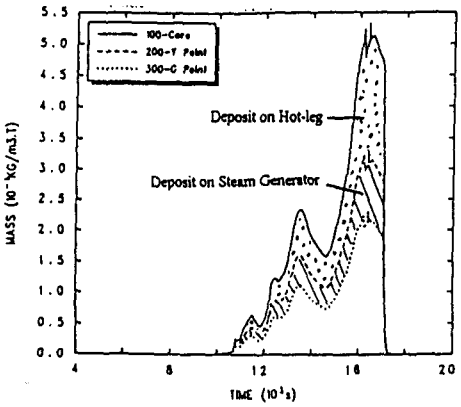

Fig.11 Relative Mass Density of Sn